

高等工科院校电子、信息类教材

现代传感器技术与应用基础

曾光宇 杨湖 李博 王浩全 编著

兵器工业出版社

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

现代传感器技术与应用基础 / 曾光宇等编著. —北京 :北京理工大学出版社, 2006.3

高等工科院校电子、信息类教材

ISBN 7-5640-0731-1

I. 现... II. 曾... III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 012491 号

出版发行 / 北京理工大学出版社 兵器工业出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefeditor@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 22.25

字 数 / 515 千字

版 次 / 2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

印 数 / 1~4000 册

定 价 / 33.00 元

责任校对 / 郑兴玉

责任印制 / 吴皓云

图书出现印装质量问题 本社负责调换

前 言

本书是在编者长期从事本科生和研究生教学的基础上,本着重基础和应用,循序渐进的原则,经过多次修改编写而成。

本书内容广泛,涉及领域较多。比较全面地介绍和论述了各类传感器的工作原理、主要结构和特性参数,较多地提供了相关传感器的信号调节电路和应用实例。

全书共 21 章,依前后顺序分为三篇:第 1、2、3 章为第一篇,主要介绍各类传感器的共性问题 and 基础知识,包括基本理论、特性参数、标定方法和选用原则;第 4 章至第 10 章为第二篇,介绍应变式传感器、压电式传感器等几种常见的应用广泛的传感器的基础知识、原理及应用;第 11 至第 21 章为第三篇,重点介绍了近十多年来出现的新型传感器原理及应用,这些传感器反映了传感器技术目前的成就和发展方向。

本书可作为电子工程、信息工程、自动化、测控技术以及仪器仪表等专业的本专科教材,也可作为相关专业的研究生或工程技术人员的参考书。作为教材用时,建议学时控制在 54 学时以内,有部分章节可作为选学或自学内容,如第 19 章生物传感器,第 20 章超导传感器等。

本书在编写过程中得到了北京理工大学、北京航空航天大学、清华大学等老师的支持并提出了许多宝贵的意见。全书由中北大学王召巴教授审阅,中北大学马慧明老师、李郁锋老师参与了制图和校对工作,在此表示感谢。本书第 1、3、7、11 章由曾光宇编写,第 2、4、6、8、9、12、13 章由杨湖编写,第 10、14、15、16、17、18、19、20 章由李博编写,第 5、21 章由王浩全编写。

传感器技术知识真正实现了多学科知识交叉,它涉及了物理、机械、电子、材料、化工、环境、日常生活等方面。由于作者知识所限和时间仓促,错误和不足之处在所难免,真诚欢迎广大读者批评和指正。

编 者

目 录

第一编 传感器技术总论

第 1 章 传感器概论.....	(2)
1.1 传感器的基本概念与组成	(3)
1.2 传感器的分类	(3)
1.3 传感器的发展趋势	(5)
思考题.....	(6)
第 2 章 传感器的基本特性.....	(7)
2.1 传感器的数学模型	(7)
2.2 传感器的静态特性	(8)
2.3 传感器的动态特性.....	(12)
思考题	(18)
练习题	(18)
第 3 章 传感器的选用与标定	(19)
3.1 测量系统的组成.....	(19)
3.2 实现不失真测试的条件.....	(20)
3.3 传感器的正确选择.....	(21)
3.4 传感器的标定.....	(24)
3.5 传感器的合理使用.....	(27)
3.6 微机化检测系统设计.....	(33)
思考题	(39)

第二编 常见传感器原理及应用

第 4 章 电容式传感器	(42)
4.1 电容式传感器的工作原理和结构.....	(42)
4.2 电容式传感器的输出特性.....	(46)
4.3 电容式传感器的等效电路.....	(48)
4.4 电容式传感器的信号调节电路.....	(49)
4.5 电容式传感器的应用.....	(55)
思考题	(57)
练习题	(58)
第 5 章 压电式传感器	(59)
5.1 压电效应.....	(59)

5.2	压电材料.....	(63)
5.3	等效电路与测量电路.....	(65)
5.4	压电式传感器种类.....	(69)
5.5	压电式传感器应用举例.....	(75)
	思考题	(78)
	练习题	(79)
第 6 章	电阻应变式传感器	(80)
6.1	电阻应变片(计)的结构与工作原理.....	(80)
6.2	应变片(计)的种类、材料及主要参数	(82)
6.3	电阻应变片的温度误差及其补偿法.....	(87)
6.4	电阻应变片的信号调节(测量)电路.....	(89)
6.5	电阻应变式传感器的应用.....	(94)
	思考题.....	(102)
	练习题.....	(102)
第 7 章	光电式传感器.....	(103)
7.1	光电效应	(103)
7.2	外光电效应器件	(105)
7.3	内光电效应器件	(108)
7.4	新型光电器件	(115)
7.5	光电传感器的应用举例	(120)
	思考题.....	(125)
	练习题.....	(125)
第 8 章	热电式传感器.....	(126)
8.1	热电偶	(126)
8.2	热电阻	(138)
8.3	热敏电阻	(145)
8.4	半导体 PN 结和集成温度传感器	(150)
	思考题.....	(155)
	练习题.....	(155)
第 9 章	电感式传感器.....	(156)
9.1	电感式传感器工作原理	(156)
9.2	电涡流式传感器	(160)
9.3	电感式传感器的应用	(166)
	思考题.....	(170)
	练习题.....	(170)
第 10 章	磁电式传感器	(171)
10.1	霍尔传感器.....	(171)
10.2	磁电感应式传感器.....	(182)
10.3	压磁式传感器.....	(185)

10.4 新型磁电式传感器.....	(196)
思考题.....	(198)
练习题.....	(199)

第三编 新型传感器原理及应用

第 11 章 光导纤维与光纤传感器	(202)
11.1 基础知识.....	(202)
11.2 光导纤维的应用.....	(208)
11.3 光纤传感器的分类及构成.....	(211)
11.4 功能型光纤传感器.....	(214)
11.5 非功能型光纤传感器.....	(217)
思考题.....	(221)
练习题.....	(222)
第 12 章 气敏传感器	(224)
12.1 半导体气敏传感器.....	(224)
12.2 半导体气敏传感器的应用.....	(228)
思考题.....	(233)
第 13 章 湿敏传感器	(234)
13.1 湿敏传感器的结构和工作原理.....	(234)
13.2 湿敏传感器的分类和特性.....	(235)
13.3 湿敏传感器的应用.....	(239)
思考题.....	(244)
第 14 章 仿生传感器	(245)
14.1 仿生传感器的主要类型及其作用.....	(245)
14.2 视觉传感器.....	(246)
14.3 听觉传感器.....	(248)
14.4 触觉传感器.....	(248)
14.5 压觉传感器.....	(249)
14.6 接近觉传感器.....	(251)
14.7 力觉传感器.....	(252)
14.8 滑觉传感器.....	(252)
思考题.....	(253)
第 15 章 超声波与超声传感器	(254)
15.1 超声波的特性.....	(254)
15.2 超声波传感器.....	(255)
15.3 超声波传感器的工作原理.....	(258)
15.4 超声波传感器的分类.....	(259)
15.5 超声波传感器的应用.....	(262)
思考题.....	(266)

第 16 章 红外辐射与红外探测器	(267)
16.1 红外辐射的基本知识.....	(267)
16.2 红外探测器.....	(269)
16.3 红外探测器的性能参数及其使用中应注意的事项.....	(273)
16.4 红外测温.....	(274)
16.5 红外成像.....	(278)
16.6 红外无损检测.....	(281)
16.7 红外探测技术在军事上的应用.....	(282)
思考题.....	(284)
第 17 章 微波传感器	(285)
17.1 微波的性质与特点.....	(285)
17.2 微波传感器的组成及分类.....	(285)
17.3 微波传感器的应用.....	(287)
思考题.....	(291)
第 18 章 射线式传感器	(292)
18.1 核辐射的物理基础.....	(292)
18.2 辐射式传感器.....	(293)
18.3 核辐射检测的应用.....	(295)
18.4 放射性辐射的防护.....	(297)
18.5 工业射线 CT 技术	(297)
思考题.....	(304)
第 19 章 生物传感器	(305)
19.1 生物传感器的组成和分类.....	(305)
19.2 酶传感器.....	(306)
19.3 微生物传感器.....	(309)
19.4 组织传感器.....	(311)
19.5 细胞器传感器.....	(313)
19.6 免疫传感器.....	(314)
19.7 生物传感器在医学中的应用.....	(316)
思考题.....	(318)
第 20 章 超导传感器	(319)
20.1 超导体.....	(319)
20.2 超导传感器的工作原理.....	(320)
20.3 超导传感器的隧道结结构.....	(320)
20.4 超导量子磁强计.....	(321)
20.5 SCQID 测量系统	(324)
20.6 介绍几种超导传感器.....	(325)
思考题.....	(326)
第 21 章 智能传感器	(327)

21.1	智能传感器的概念和特点.....	(327)
21.2	智能传感器的构成及其功能.....	(328)
21.3	典型的智能传感器.....	(337)
21.4	智能传感器今后的发展方向.....	(340)
21.5	智能传感器的应用.....	(341)
	思考题.....	(343)
	参考文献.....	(344)

第 1 章 传感器概论

测试技术中将测试分为电参数的测量与非电参数的测量。电参数(量)有:电压、电流、功率、频率、阻抗、波形等,这些参数(量)都是表征设备或系统性能的。非电参数(量)有:机械量(如位移、速度、加速度、力、扭矩、应变、应力、振动等)、化学量(如浓度、成分、气体、pH 值、湿度等)、生物量(酶、组织、菌类等)等。在生产实践中,经常遇到的是非电量的测量。在早期,非电量的测量多采用非电测量方法,如用尺子测量长度,用脚测量长度,用秤称重等。随着科技的发展,早期的测量方法已不能满足社会发展的要求。现在非电量的测量大部分是用电测量的方法去完成,其中的关键技术就是如何将非电量转换成电量,即传感器技术(或敏感技术)。

传感器技术与信息技术、计算机技术并列成为现代信息产业的三大支柱,特别是在测试系统、自动控制系统中,已成为不可缺少的重要部分。如果没有各种精确可靠的传感器做支撑,那么,计算机也无法发挥其应有的作用。

传感器能够把自然界的各种物理量和化学量等精确地变换为电信号,再经电子电路或计算机进行处理,从而对这些量进行监测或控制。这个过程与人的感官的作用可以与之对应,例如,相当于人眼(视觉)的是光敏传感器,如 CCD、光敏晶体管、光电倍增管等;相当于人耳(听觉)的是压力传感器,如电容式话筒、电动式话筒、陶瓷传感器等;相当于人皮肤(触觉)的是压力传感器和温敏传感器,如压力传感器有应变传感器,温敏传感器有热敏电阻、热电偶等;相当于人鼻子(嗅觉)的是气敏传感器,如气体传感器、燃烧式传感器等;相当于人舌头(味觉)的是味觉传感器,如离子传感器。此外,还有检测位移的差动变压器、检测转速的编码器、磁敏传感器等。其关系如图 1.1 所示。

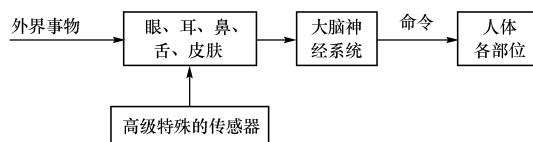


图 1.1 人与传感器

从生产实践看,从人们日常的衣食住行到各种复杂的工程,都离不开传感器。例如,工厂自动化中的柔性制造系统 FMS(Flexible Making System)、计算机集成制造系统 CIMS(Computer Integrated Making System)、大型发电厂、轧钢厂生产线、飞机(一架飞机上装有几千只传感器)、武器指挥系统、雷达、宇宙飞船、海洋探测器、各种家用电器、报警器、环境检测器、医疗卫生器械、生物工程等都依靠不同性质、不同个数的传感器来获取所需信息。毫不夸张地说,未来的社会将是传感器的社会。

1.1 传感器的基本概念与组成

1.1.1 传感器概念

传感器有时也称为探测器、变换器或变送器,是指能够感受确定(规定)的被测量(电量、机械量、化学量、生物量等)并按照一定的规律(物理规律、化学规律、生物规律等)转换成有用信号(一般情况下为电信号)的元器件或装置。传感器一般是利用物理、化学和生物等学科的某些效应或原理,如,守恒原理(能量、动量、电荷量等)场论定律(力场、电磁场、矢量场等)物理定律(表征各种器材内部性质的定律,如,欧姆定律、虎克定律等);统计规律(微观与宏观联系起来)的物理法则)等,按照一定的工艺研制出来的。

1.1.2 传感器组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和其他辅助部件组成。如图 1.2 所示。

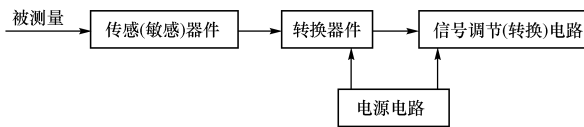


图 1.2 传感器组成方框图

敏感元件,能够直接感受(响应)被测量,并按一定规律转换成与被测量有确定关系的其他量的元件。如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件,作用是将压力转换成弹性膜片的变形。

转换元件:又称为传感元件、变换器,指能将敏感元件的输出量直接转换成电量输出的元件,一般情况下不直接感受(响应)被测量(特殊情况例外)。如应变式压力传感器中的应变片就是转换元件,作用是将弹性膜片的变形转换成电阻值的变化。

值得注意的是,并不是所有的传感器都必须含有敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电信号,它就同时兼为转换元件。敏感元件和转换元件合二为一的传感器很多,如压电传感器、热电偶、热敏电阻、光电器件等。

信号调节(转换)电路,也称为二次仪表,是把转换元件输出的电信号放大、转换为便于显示、记录、处理和控制的有用电信号的电路。这些电路的类型视传感器类型而定,通常采用的有电桥电路、放大器电路、变阻器电路和振荡器电路等。

电源电路,作用是提供能源。有的传感器需要外部电源供电,有的传感器则不需要外部电源供电,如:压电传感器。

实际上,传感器的构成方法因被测量(对象)、转换原理、使用环境及性能指标要求等具体情况的不同而有较大的差异。

1.2 传感器的分类

传感器种类繁多,千差万别。一种传感器可以用来测量多种被测量,一种被测量也可以用

多种不同的传感器来测量。因此传感器的分类方法有多种,通常的分类方法如表 1.1 所示。

表 1.1 传感器的分类

分类方法	传感器类型		备注
按工作机理分类	结构型	力平衡式、电容式、电感式等传感器	利用物理学的定律等构成,与材料关系不大
	物性型	半导体传感器	利用物质的某种和某些客观属性构成,与材料关系较大
	复合型		由结构型和物性型传感器组合而成
按组成分类	基本型、组合型、应用型传感器		按组成命名
按输入信号形式分类	物理量传感器	速度、加速度、力、压力、位移、流量、温度、光、声、色等传感器	按被测输入信号类型分类
	化学量传感器	气体、湿度、离子等传感器	
	生物量传感器	蛋白质、酶、组织等传感器	
按输出信号形式分类	模拟量传感器		输出为模拟信号
	数字量传感器		输出为数字信号
按能量供给形式分类	有源传感器	压电式、压阻式、热电式等传感器	将非电能量转换为电能量
	无源传感器	电阻式、电容式、电感式等传感器	对能量起控制和调节作用
按其他形式分类	用途类、科目类、功能类等传感器		

无论何种类型的传感器,它作为测量与控制系统的首要环节,应能达到快速、准确、可靠且经济地实现信息采集和转换的基本要求。即:

- (1) 传感器要有足够的容量——传感器的工作范围或量程足够大,具有一定的过载能力;
- (2) 传感器要与系统匹配性好,灵敏度高——输出量与被测量之间具有确定的线性关系;
- (3) 传感器反应速度快,工作可靠性好;
- (4) 传感器适用性和适应性强——对被测对象影响小,内部噪声小又不易受干扰;
- (5) 传感器精度适当,稳定性好——静态、动态响应要满足要求;
- (6) 使用经济——成本低、寿命长。

工程中要综合考虑上述要求,使用时应尽量满足上述要求。

由于传感器的种类很多,因此本教材内容具有如下特点:

- (1) 内容丰富,知识面广(包括机械、力学、材料学、电工学、热学、光学、原子物理学、电子学、化学及辐射、超声和光纤技术、接口技术等);
- (2) 内容跳跃性大且离散;
- (3) 内容无连贯性,各章基本上自成体系;
- (4) 难度较大;
- (5) 可研读性强,实践性强;

- (6) 各种传感器的结构复杂 ,工艺要求高 ;
- (7) 接口电路形式不一 ,应用广泛。

1.3 传感器的发展趋势

传感器技术是 21 世纪人们在高新技术领域争夺的一个制高点。从 20 世纪 80 年代起 ,日本就将传感器技术列为优先发展的高新技术之首 ,美国等西方国家也将此技术列为国家科技和国防技术发展的重点内容。我国从 20 世纪 80 年代以来也已将传感器技术列入国家高新技术发展的重点。21 世纪是人类全面进入信息电子化的时代 ,作为现代信息技术的三大支柱之一的传感器技术必将有较大的发展。有专家认为 ,我国今后传感器方面的研究和开发方向应是 :微电子机械系统、汽车传感器、环保传感器、工业过程控制传感器、医疗卫生和食品业检测传感器、新型敏感材料等。

下面将传感器的发展趋势概括为以下几个方面。

1.3.1 向结构型传感器方向发展

目前 ,在工业控制领域大量使用的是结构型传感器。由于结构型传感器在原理、材料和结构形式等方面都不断发生变化 ,除主要向高稳定性、高可靠性和高精度方向发展外 ,正在向有源化方向发展。即将敏感元件和电路组装在一起 ,减小装置体积 ,提高信噪比和精度。结构传感器由于采用新结构、新材料和新工艺 ,可大幅度提高传感器的性能。

1.3.2 向小型化、集成化方向发展

由于航天和航空技术的发展以及医疗器件的需要 ,传感器必须向小型化方向发展 ,以便减小体积和质量。而小型化的基础是集成化 ,它分为传感器本身的集成化和传感器与后续电路的集成化。集成化传感器由低级发展到高级 ,把各种调节和补偿电路与传感器集成在一起 ,降低了对环境的要求 ,提高了信噪比和精度。目前集成化传感器主要使用硅材料 ,它既可以制作电路 ,又可以制作磁敏、力敏、温敏、光敏和离子敏器件 ,所以已有集成磁敏传感器、集成功敏传感器、集成温敏传感器、集成光敏传感器和集成场效应离子敏传感器等出现。在制作敏感元件时要采用单晶硅的各向同性和各向异性腐蚀、等离子刻蚀、离子注入等工艺 ,利用微机械加工技术在单晶硅上加工出各种弹性元件。目前 ,发达国家正在把传感器与电路集成在一起进行研究。

1.3.3 向智能化方向发展

将传统的传感器和微处理器及相关电路组成一体化的结构就是智能传感器。智能传感器可以分为三种类型 ,即具有判断能力的传感器、具有学习能力的传感器和具有创造能力的传感器。智能传感器具有以下功能 : (1) 具有自校准功能。操作者输入零值或某一标准量值后 ,自校准软件可以自动地对传感器进行在线校准。(2) 具有自补偿功能。智能传感器在工作中可以通过软件对传感器的非线性、温度漂移、响应时间等 ,进行自动补偿。(3) 具有自诊断功能。智能传感器在接通电源后 ,可以对传感器进行自检 ,检查各部分是否正常。在内部出现操作问题时 ,能够立即通知系统 ,通过输出信号表明传感器发生故障 ,并可诊断发生故障的部件。

(4)具有数据处理功能。智能传感器可以根据内部的程序,自动处理数据。例如进行统计处理、剔除异常数据等。(5)具有双向通信功能。智能传感器的微处理器与传感器之间构成闭环,微处理器不但接收、处理传感器的数据,还可以将信息反馈至传感器,对测量过程进行调节和控制。(6)具有信息存储和记忆功能。(7)具有数字信号输出功能。智能传感器输出数字信号,可以很方便地和计算机或接口总线相连。

1.3.4 向开发新型传感器方向发展

利用具有新效应的敏感功能材料或开发新的敏感功能材料研制新型传感器。如:利用量子力学效应研制高灵敏度传感器,利用核磁共振吸收效应研制的磁敏传感器,可将检测范围扩展到地磁场强的 10^{-7} ,利用约瑟夫逊效应研制的热噪声温度传感器,可测 10^{-6} K的超低温;利用光子滞后效应研制的快速红外传感器等。

1.3.5 向研究开发生物传感器方向发展

研究人类和动物的器官,利用仿生学开发仿生传感器。

1.3.6 向多维化与灵巧化方向发展

多维化传感器是把多个传感器单元做在一起,则可识别空间和复杂的环境状态,X射线的CT即为此种传感器。

灵巧传感器属智能传感器中的一种,具有可编程与自适应功能,是计算机技术和传感器技术的进一步结合,使传感器的作用更为重要。

【思考题】

- 1-1 传感器的基本概念是什么?一般情况下由哪几部分组成?
- 1-2 传感器有几种分类形式,各种形式之间有什么不同?

第 2 章 传感器的基本特性

在生产过程和科学实验中,要对各种各样的参数进行检测和控制,就要求传感器能感受被测非电量的变化并不失真地变换成相应的电量输出,这取决于传感器的基本特性,即输出-输入特性。传感器所感受(测量)的信号一般有两种形式:一种是稳定的,即不随时间变化或随时间变化极其缓慢,称为静态信号;另一种是不稳定的,即随时间迅速变化,称为动态信号。由于被测输入量的状态不同,传感器所呈现出来的输出-输入特性也不同。因此存在所谓的静态特性和动态特性。具有良好的静、动态特性的传感器可以降低或消除传感器在测量过程中的误差。

【基本要求】

- (1) 掌握传感器静态特性指标和定量描述方法;
- (2) 掌握传感器动态特性指标和定量描述方法;
- (3) 了解传感器的两种数学模型;
- (4) 了解一阶传感器的频率响应函数和传递函数。

2.1 传感器的数学模型

从系统角度来说,一个传感器就是一种系统。根据系统工程学理论,一个系统总可用一个数学方程式或函数来描述。即用某种方程式或函数表征传感器的输出和输入间的关系和特性,从而用这种关系指导传感器的设计、制造、校正和应用。通常情况下,从传感器的静态输入-输出关系和动态输入-输出关系两方面来建立数学模型。但在实际当中,能准确建立一个系统的数学模型是困难的。这就要求我们要好好积累知识、积累经验。下面介绍传感器静、动态数学模型描述方法。

2.1.1 传感器的静态数学模型

静态数学模型是指在静态输入信号(输入信号不随时间变化)作用下,描述传感器输出量与输入量之间关系的一种函数式。若不考虑蠕变效应和迟滞特性,传感器静态数学模型一般可用式(2.1)来表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2.1)$$

式中, x 为输入量; y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为线性灵敏度; $a_2 \dots a_n$ 为非线性项系数。

传感器静态数学模型有三种有用的特殊形式:

- (1) $y = a_1x$ 表示传感器的输出与输入呈严格的理想线性关系且无零漂;
- (2) $y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots$ 表示传感器的输出与输入呈偶次非线性关系;

(3) $y = a_1 + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots$ 表示传感器的输出与输入呈奇次非线性关系。

2.1.2 传感器的动态数学模型

动态数学模型指传感器在准动态信号或动态信号(输入随时间而变化)作用下,描述其输出和输入信号之间关系的一种函数式,常采用微分方程和传递函数来描述。

1. 微分方程

绝大多数传感器都属模拟(连续变化)系统之列,描述模拟系统的一般方法是采用微分方程(描述离散系统用差分方程)。在实际模型建立中,一般采用线性不变(线性定常控制)系统理论(即线性定常控制系统)来描述传感器的动态特性,即用线性定常系数微分方程表示传感器输出量 y 和输入量 x 的关系。一般形式如式(2.2)

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2.2)$$

式中 $a_n, a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0$ 和 b_m, b_{m-1}, \dots, b_0 为传感器的结构参数(常量),对于传感器,除 $b_0 \neq 0$ 外,一般取 $b_1, b_2, \dots, b_m = 0$ 。

对于复杂的系统,其微分方程的建立求解都是很困难的,但是一旦求出微分方程的解就能清楚地给出其稳态响应和暂态响应。因此为了求解方便,常采用拉氏变换法或采用下面要介绍的传递函数法。

2. 传递函数

如果在 $t \leq 0$ 时,有 $y(t) = 0$, 则函数 $y(t)$ 的拉氏变换可定义为

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (2.3)$$

式中 $s = \sigma + j\omega$, $\sigma > 0$ 。

对式(2.2)两边取拉氏变换得

$$Y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0) = X(s)(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0) \quad (2.4)$$

定义:在零状态条件(初始条件为零的情况)下,输出 $y(t)$ 的拉氏变换 $Y(s)$ 与输入 $x(t)$ 的拉氏变换 $X(s)$ 之比称为传感器的传递函数,常用 $H(s)$ 来表示,即

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (2.5)$$

从上述传递函数可知,它与输入量无关,只与系统(传感器)结构和参数有关。也就是说,无须了解复杂系统(传感器)的具体内容,只要给系统一激励(作用)信号,便可得到这一系统的响应,其相应特性便可确定。传递函数可用框图来表示,如图 2.1 所示。

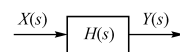


图 2.1 传递函数的图示

2.2 传感器的静态特性

静态特性是指传感器在被测输入量各值处于稳定状态时的输出输入关系。传感器静态特性一般由下列几种性能指标来描述。

2.2.1 线性度

许多传感器的输出-输入特性关系曲线是非线性的,如果不考虑迟滞特性和蠕变效应,传感器的特性曲线一般可用下式表示。

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2.6)$$

式中 y 为输出量(输出信号); x 为输入量(被测信号); a_0 为零位输出(零偏); a_1 为传感器的灵敏度,常用 S_n 来表示; a_2, a_3, \dots, a_n 为待定系数。

由式(2.6)可知,传感器的线性特性可能有四种情况,如图 2.2 所示。

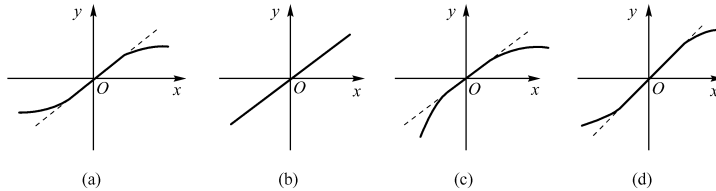


图 2.2 传感器的静态特性

(a) 仅有奇次项的非线性特性; (b) 理想的线性特性; (c) 仅有偶次项的非线性特性; (d) 一般情况特性

1. 仅有奇次项的非线性特性

如图 2.2(a)所示,在这种情况下,有

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (2.7)$$

具有这种特性的传感器,在原点附近相当宽的范围内其输出-输入特性近似成线性特性,它相对坐标原点对称的,有 $y(x) = -y(-x)$ 。

2. 理想的线性特性

如图 2.2(b)所示,在这种情况下,有 $a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$

于是得到 $y = a_1x$ (2.8)

此时 $a_1 = \frac{y}{x} = S_n = \text{常数}$ 称为传感器的灵敏度。

3. 仅有偶次项的非线性特性

如图 2.2(c)所示,在这种情况下,有

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots \quad (2.9)$$

具有这种特性的传感器,其静态特性曲线不具有对称性,其线性范围较窄。通常在设计传感器时,很少采用这种特性。

4. 一般情况特性

如图 2.2(d)所示,在使用具有非线性特性的传感器时,如果非线性项的方次不高,则在输入量变化范围不大时,可以用切线或割线来代替实际曲线的一段,使传感器的特性曲线近似于线性情况。这种处理方法称为传感器非线性特性的线性化。所采用的直线称为拟合直线。

传感器的线性度是用来表征传感器的输出与输入之间的实际关系曲线偏离拟合直线的程度,又称为非线性误差。通常用相对误差来表示

$$E = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (2.10)$$

式中 Δ_{\max} 是指输出信号和输入信号(被测量)之间实际关系曲线与拟合直线之间的最大偏差量; $y_{F.S}$ 是指输出满量程值(理论满量程输出值)。

在实际当中,几乎每一种传感器都存在非线性,因此在使用传感器时必须对传感器的输出-输入特性进行线性化处理,即求取拟合直线。

常用的线性化处理方法有 5 种:

1. 理论直线法

以传感器理论特性曲线作为拟合直线,与实际测试值无关。这种方法的特点:简单、方便,但 Δ_{\max} 较大。

2. 端点直线法

以传感器校准曲线两端点间的连线作为拟合直线。直线方程式为 $y = kx + b$ 。这种方法的特点:简单、方便,但 Δ_{\max} 很大。

3. 最佳直线法

以“最佳直线”作为拟合直线,该直线能保证传感器正反行程校准曲线对拟合直线的正、负偏差相等,并且有最小 Δ_{\min}^2 。这种方法的特点是只能通过图解法或计算机求解,且精度高,但较复杂。

4. 切线法

以实验曲线上某一点的切线的一段为拟合直线。一般能在局部曲线上应用。

5. 最小二乘法

这种方法是按最小二乘原理来求取拟合直线的。该直线能保证传感器校准数据的残(偏)差平方和最小。

设拟合直线为 $y = kx + b$, b 和 k 根据下述分析求得。

设实际校准测试点有 n 个,则第 i 个校准数据 y_i 与拟合直线上相应值之间的残(偏)差为 $\Delta_i = y_i - (b + kx_i)$ 。按最小二乘法原理知,应使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 最小(即由 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数并令其等于 0),则可求得 k 和 b ,即

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.11)$$

式中

$$\begin{aligned} \sum x_i &= x_1 + x_2 + \dots + x_n; & \sum y_i &= y_1 + y_2 + \dots + y_n; \\ \sum x_i y_i &= x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n; & \sum x_i^2 &= x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \end{aligned}$$

这种方法的特点是精度高,但校准曲线相对拟合直线的最大偏差的绝对值不一定最小,最大正、负偏差绝对值不一定相等。

2.2.2 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下输出增量 Δy 与输入变化量 Δx 之比,常用 S_n 表示